

**УДК 621.37:543.42**

**М.И. ДЗЮБЕНКО**, д-р физ.-мат. наук, проф., ИРЭ НАН Украины, г. Харьков  
**Д.Ф. КУЛИШЕНКО**, аспирант, ИРЭ НАН Украины, г. Харьков  
**А.А. ПРИЁМКО**, канд. тех. наук, ИРЭ НАН Украины, г. Харьков  
**В.С. КОЛПАКОВ**, студент, ХНУРЕ, г. Харьков.

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОГО ЛАЗЕРНОГО ЭМИССИОННОГО АНАЛИЗА**

Представлено теоретическое описание процесса взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения с веществом на начальной стадии испарения. Разработана математическая модель этого процесса. Определено оптимальное время регистрации эмиссионного спектра с учетом минимизации повреждений изучаемого образца. Проведена экспериментальная проверка теоретических предпосылок.

Представлено теоретичний опис процесу взаємодії низькоінтенсивного лазерного випромінювання з металами на початковій стадії випаровування. Розроблена математична модель цього процесу. Визначено оптимальний час реєстрації емісійного спектру з урахуванням мінімізації пошкоджень зразка, що вивчається. Проведена експериментальна перевірка теоретичних посилок.

Лазерно-эмиссионный спектральный анализ в настоящее время является одним из широко используемых методов анализа состава металлических сплавов. Это обусловлено рядом его особенностей, таких как минимальная предварительная подготовка пробы; возможность экспрессного анализа; высокая чувствительность (несколько мг/кг); быстрота анализа (в зависимости от метода обработки спектральных данных - в пределах нескольких минут); высокая локальность анализа и возможность проведения многоэлементного анализа. Особый интерес авторов вызывает энергетический метод количественного лазерного анализа [1]. Этот метод, по нашему мнению, наиболее пригоден для проведения экспресс-анализа в силу низких требований к мощности лазера (импульс  $\sim 0.5$  мДж) и небольшого времени обработки спектральных данных (в пределах 4 секунд).

Вопрос выбора параметров регистрации спектра для лазерного количественного спектрального анализа исследован довольно хорошо, но большинство работ в данной области имеют дело с высокоинтенсивным лазерным излучением. В статье проведено изучение особенностей взаимодействия сплавов металлов с низкоинтенсивным лазерным излучением с целью определения оптимального окна регистрации спектра.

Теории взаимодействия мощного излучения с веществом, разработанные в 60–80-ых годах, носили, в основном исследовательский характер. Общим для них является то, что результат взаимодействия зависит от соотношения плотности мощности и плотности энергии излучения. Поэтому практическое использование результатов, разработанных теорий, как правило, заканчивается на оценке этих параметров при решения конкретной задачи. Это хорошо видно, например, из работ [2-4]. Основой изучения нами процесса выброса металла являются эмпирические данные.

Для экспериментов использовался лазер на алюмо-иттриевом гранате, работающий в режиме с модулированной добротностью. Длина волны излучения 1,06 мкм. Модуляция добротности резонатора осуществлялась с помощью акусто-оптического модулятора. Частота модуляции варьировалась от 100 до 4000 Гц. Средняя мощность излучения составляла 0,6 Вт, при длительности импульса 300 нс (рис.2).

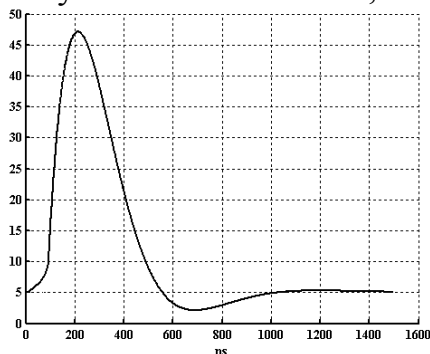


Рис.2. Осциллограмма лазерного импульса.

Процесс взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металла состоит из следующих этапов:

- нагревания объёма взаимодействия до температуры плавления;
- нагревания объёма взаимодействия до температуры кипения;
- испарение нагретого объёма.

Выброс металла за пределы зоны взаимодействия происходит в процессе плавления и кипения материала из-за резкого изменения его объёма и давления паров. Как показывают эксперименты, выбросы существенно

зависят от материала. На рис.3 приведены фотографии точечного воздействия лазерного излучения на различные металлы.

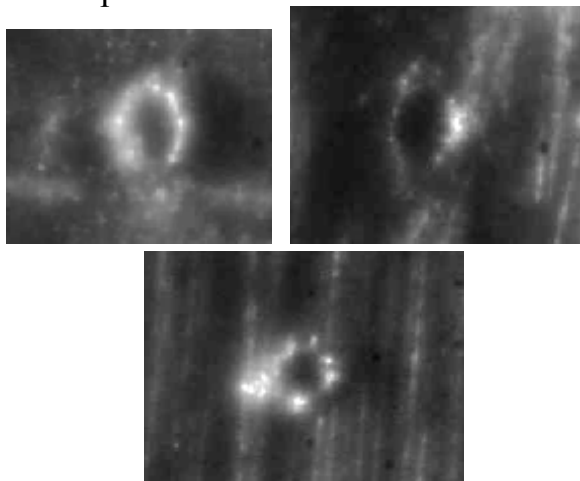
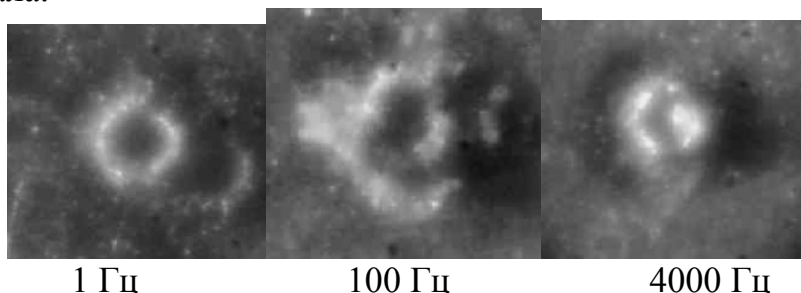


Рис.3 Точечное воздействие лазерного излучения на латунь, серебро, медь.

При воздействии лазерного импульса на металл над его поверхностью образуется облако из газообразного вещества, которое рассеивает и поглощает падающее излучение.

Из-за поглощения и рассеяния на продуктах испарения, плотность мощности излучения, попадающего на материал, начинает уменьшаться. В связи с этим температура уменьшается, и объём жидкой фазы металла резко увеличивается. Дальнейшее воздействие излучения приводит к выбросу материала из зоны облучения. В случае, когда в одну точку попадает несколько импульсов, происходит углубление отверстия и рассеянное парами излучение поглощается стенками. Так как интенсивности рассеянного излучения не хватает на испарение, происходит плавление стенок и под давлением паров выброс материала.



1 Гц

100 Гц

4000 Гц

Рис.3 Результат воздействия на латунь 100 импульсов с различными частотами (диаметр кратера с выбросами 70 мкм).

Эксперименты показали, что частота импульсов, попадающих в одну точку, практически не влияет на количество выбросов (рис.3). Скорость удаления продуктов испарения из зоны воздействия имеет величину порядка  $10^{10}$  мкм/с [2]. При глубине кратера 5 мкм он станет «чистым» через 0,05 нс. Это объясняет тот факт, что количество выбросов существенно не зависит от частоты следования импульсов.

Примем допущение о том, что лазерный луч имеет гауссовское пространственное распределение интенсивности. Тогда температура как функция расстояния  $r$  от центра нагреваемого пятна, глубины  $z$  от поверхности, и времени  $t$  определяется формулой [2]:

$$T(r,z,t) = \frac{d^2 F}{K} \sqrt{\frac{\chi}{\pi}} \int_0^t \frac{\exp(-z^2/[4\chi \cdot h]) \cdot \exp(-r^2/[4\chi \cdot h + d^2])}{(4\chi \cdot h + d^2) \sqrt{h}} dh, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр луча;  $K$  – коэффициент теплопроводности;  $F$  – плотность потока лазерного излучения;  $\rho$  – коэффициент температуропроводности ( $\rho = \frac{K}{c\tau}$ , где  $c$  – удельная теплоёмкость);  $z$  – глубина;  $r$  – расстояние от центра нагреваемого пятна.

В формуле (1) плотность потока излучения  $F$  считается постоянной. Практически же, она является функцией времени и зависит от параметров импульса накачки активного элемента лазера. Одним из вариантов такой зависимости, полученной нами эмпирически, является следующая:

$$F(t) = 3 \cdot 10^{11} \sqrt{t}. \quad (2)$$

На рисунке 4 представлены зависимости скорости нагрева меди и серебра на глубине 5 мкм, рассчитанные на основании (1) и (2). Точками отмечены температуры плавления, после которых коэффициент теплопроводности меняется, и процесс нагревания идёт по другому закону.

При достижении плотности излучения на материале  $10^{10}$ - $10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> теплопроводность «не успевает» отводить энергию от поглощающей его поверхности и начинается испарение материала. Время нагрева материала до температуры испарения определяется выражением [2]:

$$t_{\text{исп}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{K_{\text{ср}}}{F^2} (T_{\text{исп}} - T_{\text{пл}})^2, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность вещества;

$T_{\text{исп}}$  – температура испарения вещества;

$T_{\text{пл}}$  – температура плавления вещества.

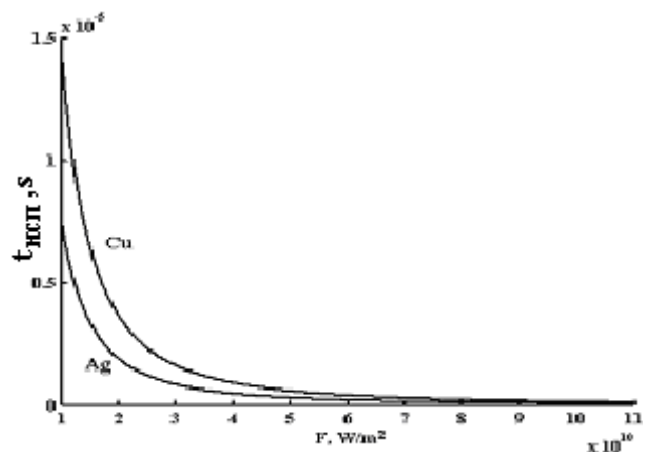
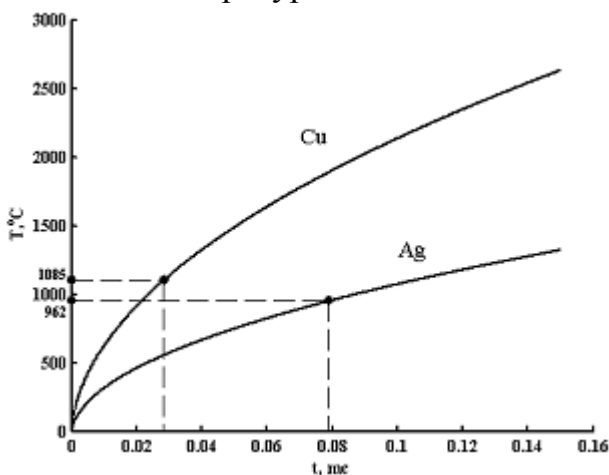


Рис.4. Скорость нагрева материала на глубине 5мкм

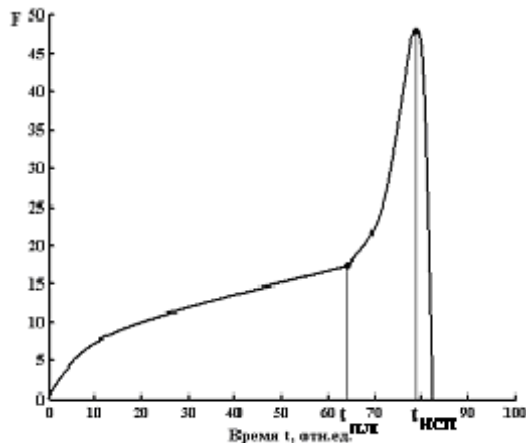


Рис.6. Форма импульса.

поглощаться и рассеиваться.

Таким образом, оптимальная длительность импульса лазерного излучения  $\tau$ , для пробоотбора с минимальным выбросом вещества, определяется из выражения:

$$\tau = t_{1\bar{e}} + t_{\bar{e}III}.$$

Энергия излучения, попадающая на материал после этого времени, идёт на плавление материала. Скорость нарастания плотности мощности в импульсе после  $t_{кип}$  должна быть максимальной, а после начала испарения воздействие на материал должно быть прекращено. Теоретический анализ и эксперименты показали, что для реализации лазерного с минимальным выбросом вещества необходимо сформировать импульс лазерного излучения следующего вида (рис.6). В зависимости от анализируемого материала, для получения максимальной эффективности пробоотбора должна изменяться форма импульса  $F(t)$ .

**Выводы.** На основании проведенного анализа взаимодействия лазерного излучения с рядом металлов установлено, что основными факторами, влияющими на выброс и атомизацию металла, являются:

- теплофизические свойства металла;
- форма импульса воздействия, особенно крутизна его заднего фронта.

Из исследований следует, что возможно увеличение количества испаренного вещества с помощью правильного выбора формы лазерного импульса. Следующим шагом в увеличении параметров регистрации очевидно может стать переход к двух импульсной схеме пробоотбора: первый импульс лазера испаряет вещество, а второй максимально возбуждает полученное облако газа. Однако для использования лазерного пробоотбора в таком режиме требуется провести дополнительные исследования времени жизни и эволюции во времени газового облака, а также эффективности его взаимодействия с излучением.

**Список литературы:** 1. Дзюбенко М.И., Колпаков С.Н. Кулишенко Д.Ф., Приемко А.А. Безэталонный метод количественного спектрального анализа сплавов металлов // Материалы ФНМ-2007, с. 92-93. 2. Горный С.Г., Григорьев А.М., Лопота В.А., Туригин Г.А. Особенности получения отверстий в металлических материалах модулированным лазерным излучением // Физика и химия обработки материалов. – 1998. - №5. – С. 23-26. 3. Углов А.А. Особенности импульсного воздействия лазерного излучения на металлы // Физика и химия обработки материалов. – 1998. - №4. – С. 20-22. 4. Углов А.А., Смуров И.Ю., Гуськов А.Г., Аксёнов Л.В. Плавление и термокапллярная конвекция при воздействии импульс-

Рис.5. Время нагрева материала от температуры плавления до испарения

Так как испарение вещества начинается после его расплавления, коэффициент теплопроводности в этом случае необходимо брать для жидкой фазы металла. Графики зависимостей времени нагрева металла до температуры испарения  $t_{исп}$  от плотности мощности  $F$  лазерного излучения, построенные на основании (3) (рис.5), показывают, что испарение металла очень сильно зависит от плотности мощности. После начала испарения оптическое излучение начинает

**УДК 681.518.54**

**Л.М. ЗАМІХОВСЬКИЙ**, докт. техн. наук, професор

**Р.Б. СКРИПЮК**, аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ

## **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ НЕПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВАЛКОВОГО МЛИНА AG-MPS 180BK**

Розглянуто методичний підхід до діагностування технічного стану робочих органів млина AG-MPS 180BK з використанням методу непараметричної ідентифікації. Показано, що зміна потужності спектру перехідного процесу млина на частоті 12 Гц і 25 Гц може бути використана за діагностичні ознаки зміни його стану.

Рассмотрен методический подход к диагностированию технического состояния рабочих органов мельницы AG-MPS 180BK с использованием метода непараметрической идентификации. Показано, что изменение мощности спектра переходного процесса мельницы на частоте 12 Гц и 25 Гц может быть использовано в качестве диагностических признаков изменения его состояния.

Вертикальний валковий млин фірми PFEIFFER AG-MPS 180BK є основним вузлом технологічного процесу приготування пилевугільної суміші, що є заміником природного газу в технологічному процесі випалювання клінкеру. Від технічного стану робочих органів валкового млина (помольних валків та бігової доріжки помольної чаші) залежить як надійність його роботи, так і ефективність процесу помолу вугілля та якість вихідного продукту, яка складає 65% собівартості цементу. На жаль сьогодні відсутні методи, які дозволяють оцінити фактичний технічний стан робочих органів млина і проводи наплавку їх зношених частин за потребою. Існуючий метод вимірювання величини зношення робочих органів вимагає технологічної зупинки млина і, як було показано в [1], є недосконалим, оскільки отримані результати не відповідають реальним.

У зв'язку з цим метою статті є спроба використати основні положення теорії ідентифікації систем для обґрунтування можливості розробки на їх основі методу діагностування робочих органів млина в процесі його експлуатації.

Теорія ідентифікації систем є сьогодні достатньо розвинутою, але ще не цілком організованою областю знань. Значна різноманітних методів та засобів ідентифікації призводить робить застосування цього напрямку науки швидше за все мистецтвом, ніж використанням строгої методики. Тому розв'язок тих, чи інших завдань ідентифікації майже ніколи не має однозначного результату: як правило, задачу можна розв'язати і іншим шляхом з дещо іншими результатами. Здається не є винятком і спосіб, запропонований нижче.

Розрізняють два основних типи моделей реальних систем – статичні та динамічні. Статичні моделі мають, як правило, великий набір входів та виходів і використовують